

Coeficientes de forma en sección compuesta con ensayos en túnel de viento

Nelson Fundora Sautié e-mail: nelsonfs@civil.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Habana, Cuba.

Edith Beatriz Camaño Schettini e-mail: bcamano@iph.ufrgs.br
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.

Acir Mercio Loredou Souza e-mail: lac@cpgec.ufrgs.br
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.

Vivian Elena Parnás e-mail: vivian@civil.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Habana, Cuba.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo obtener los coeficientes de forma de una sección compuesta por dos angulares de alas iguales, no reflejada en las normas de cálculo de carga de viento, utilizada en Cuba para la construcción de torres de telecomunicaciones autosoportadas de base triangular. Para ello fue realizado un ensayo experimental en el túnel de viento Joaquim Blessmann, perteneciente a la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, para ángulos de ataque entre 0° y 180° con intervalos de 15° . Los resultados obtenidos permiten demostrar la independencia de los coeficientes de forma del número de Reynolds y del contenido de turbulencia del flujo. Se reportan los coeficientes de forma corregidos producto del efecto de bloqueo, obteniéndose los mayores valores en los ángulos de ataque de 0° y 30° .

Palabras clave: coeficientes de forma, correcciones por efecto de bloqueo, número de Reynolds, sección compuesta, túnel de viento.

Form coefficients in a compound section from wind tunnel tests

ABSTRACT

The objective of this paper is to obtain the form coefficients of a two-equal leg angle section, not reflected in the wind load calculation standards used in Cuba for the construction of triangular-based self-supporting telecommunication towers. An experimental test was carried out in the Joaquim Blessmann wind tunnel, belonging to the Federal University of Rio Grande do Sul, for angles of attack between 0° and 180° with intervals of 15° . The obtained results allow to demonstrate the independence of the form coefficients of the Reynolds number and of the turbulent strength of the flow. The corrected form coefficients are reported as a result of the blockage effect, obtaining the highest values in the attack angles of 0° and 30° .

Keywords: form coefficients, blockage effect corrections, Reynolds number, compound section, wind tunnel.

INTRODUCCIÓN

Las torres de telecomunicaciones debido a su altura, alto nivel de exposición, flexibilidad, ligereza y bajo amortiguamiento estructural, son muy susceptibles a la acción de la carga de viento. En Cuba, producto de la ocurrencia de eventos meteorológicos de gran magnitud se han reportado numerosos colapsos de este tipo de estructuras, provocando serias afectaciones económicas. A partir de las múltiples configuraciones de los reticulados, así como de las secciones, simples o compuestas, que pueden emplearse resulta difícil generalizar los coeficientes de forma necesarios en la determinación de la carga de viento actuante sobre estas estructuras.

La norma cubana de cálculo de carga de viento (NC285 2003) incluye los coeficientes de forma para las geometrías más empleadas. La sección compuesta objeto de estudio es ampliamente empleada en torres autoportadas de base triangular, sin embargo, al no estar reflejada en la citada norma, deben emplearse valores aproximados, lo que puede atentar contra la eficiencia y la seguridad estructural de los diseños, lo que brinda importancia a la realización de estudios experimentales y numéricos para la obtención de valores confiables a emplear.

Los ensayos experimentales en túnel de viento constituyen la principal herramienta para la obtención de los coeficientes de forma en torres de telecomunicaciones, estos ensayos pueden realizarse por dos vías fundamentales: la primera divide la torres en secciones o tramos calculando los coeficientes de forma para cada tramo de la torre, obteniéndose el coeficiente total por la suma de los coeficientes parciales de cada sección (Carril and Isyumov 2003), (Prud'homme et al. 2014). La segunda vía obtiene los coeficientes de forma en los elementos aislados que conforman el reticulado de la torre (Flachsbart and Winter 1935), para luego, considerando el coeficiente de llenado de la celosía y el espaciamiento entre estas, estimar el coeficiente de forma de la torre.

Esta vía de solución es la propuesta en las normas de cálculo de carga de viento consultadas (NC285 2003), (ASCE/SEI 2010) que reflejan valores de coeficientes pertenecientes a secciones comúnmente empleadas en la construcción de este tipo de estructuras, sin embargo, en Cuba, son empleadas secciones compuestas no reflejadas en las citadas normas. Este es el caso de las torres de telecomunicaciones autoportadas de base triangular que emplean en sus apoyos una sección compuesta por dos angulares de alas iguales $L 125 \times 125 \times 12$ mm, unidos por una plancha metálica formando un ángulo de 60° en el interior y 120° en el exterior (figura 1). Esta problemática constituye punto de partida del presente trabajo cuyo objetivo es obtener los coeficientes aerodinámicos de esta sección compuesta mediante ensayo en túnel de viento.

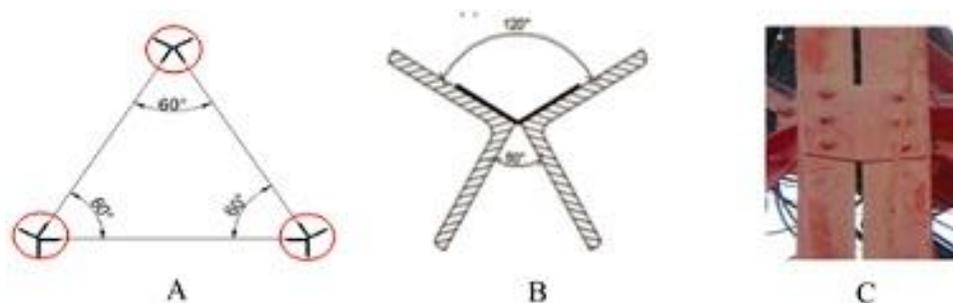


Figura 1. A) Planta de la torre de telecomunicaciones. B) Sección del apoyo. C) Elevación del apoyo (fuente: elaboración propia)

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Para la realización de los ensayos se emplea el túnel de viento Prof. Joaquim Blessmann perteneciente a la Universidad Federal de Rio Grande del Sur (UFRGS), el cual se encuentra acreditado y certificado según la norma NBR ISO/IEC 17025:2005. Este es un túnel de circuito cerrado, subsónico, que reproduce la capa límite atmosférica y permite la generación de un flujo a sección vacía con velocidad máxima de 42 m/s (figura 2).

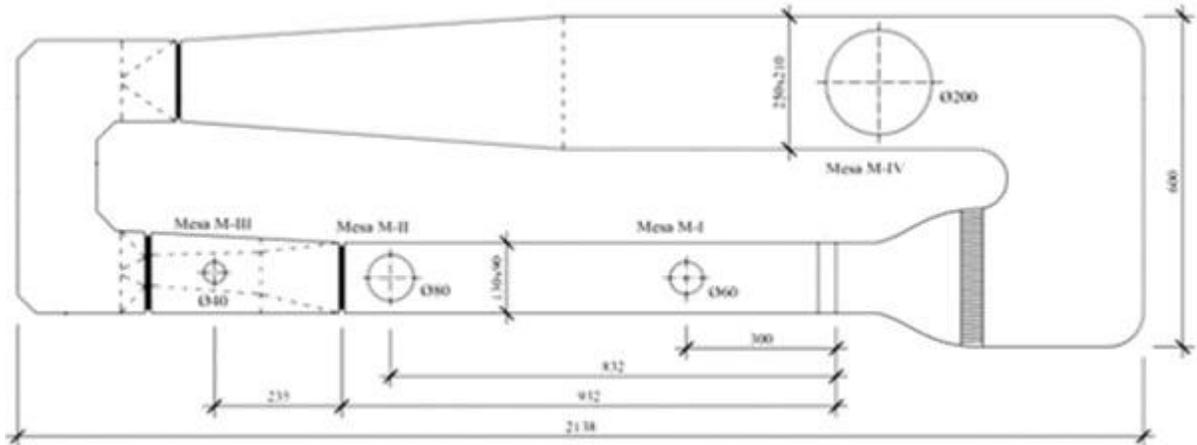


Figura 2. Túnel de viento Prof. Joaquim Blessmann (fuente: elaboración propia)

Cuenta con 4 mesas de simulación, una sección de trabajo de 9,32 m de longitud y secciones transversales de $1,2 \times 0,9$ m en la Mesa I y $1,3 \times 0,9$ m en la Mesa II con el objetivo de compensar el desarrollo de la capa límite.

Para la generación de diversos perfiles de velocidad, este túnel incluye una cámara de simuladores que permite la combinación de diversos generadores de turbulencia tipo malla, de aguja o placas perforadas (Blessmann 1982).

El ensayo realizado es dividido en dos etapas, en la primera etapa se seleccionan tres ángulos de ataque o ángulo de incidencia del flujo sobre el obstáculo (0° , 45° y 90°) incluidos en las normativas consultadas (ASCE/SEI 2010) para estudiar la independencia de los coeficientes de forma del número de Reynolds (Re) y del contenido de turbulencia presente en el flujo.

En esta etapa las hipótesis de partida planteadas son las siguientes: a partir de un determinado valor de Re los coeficientes de forma no presentan variaciones significativas y el contenido de turbulencia en el flujo no modifica notablemente los valores de coeficientes de forma obtenidos en el ensayo. Estas hipótesis asumen que el comportamiento de la sección compuesta objeto de estudio posee un comportamiento típico de cuerpos no aerodinámicos con aristas vivas referido por Slater (1969). En la determinación del número de Reynolds (Re) se emplea la expresión (Streeter et al. 2000).

$$Re = \frac{VD}{\nu}, \quad (1)$$

donde: V - velocidad media del flujo, D - dimensión característica normal al flujo asumida como la proyección vertical de la sección compuesta correspondiente al ángulo de ataque de 0° ($D = 0,22$ m), ν - viscosidad cinemática del fluido.

Para la generación del flujo uniforme de alta intensidad de turbulencia se emplea un dispositivo tipo malla que genera una intensidad de turbulencia longitudinal $I = 10,5 \%$ a una altura de 450 mm de la superficie inferior de la sección de ensayo (figura 3). En la Mesa 1 la intensidad de turbulencia generada para un flujo uniforme de baja intensidad de turbulencia es de $0,5 \%$ (Blessmann 1982). En la tabla 1 se proponen las mediciones a realizar en la primera etapa del ensayo.

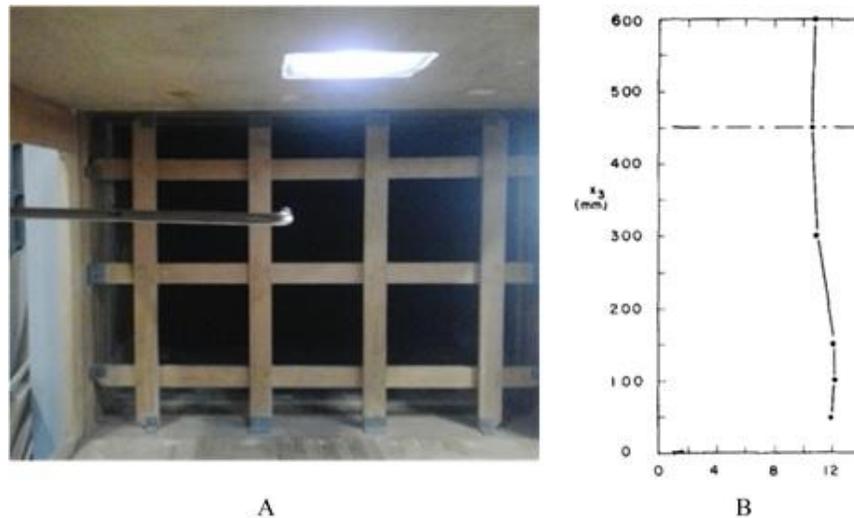


Figura 3. A) Simulador de turbulencia tipo malla. B) Intensidad longitudinal de turbulencia en el eje vertical Mesa I para simulador de turbulencia tipo malla $I = 10,5 \%$ (Blessmann 1982)

Tabla 1. Primera etapa del ensayo

| Re | $V(m/s)$ | Ángulos de ataque | Tipo de flujo |
|--------------------|----------|-------------------|---|
| $7,00 \times 10^4$ | 5 | 0°, 45°, 90° | Uniforme de baja intensidad de turbulencia ($I = 0,5 \%$) Uniforme de alta intensidad de turbulencia ($I = 10,5 \%$) |
| $1,13 \times 10^5$ | 8 | | |
| $1,40 \times 10^5$ | 10 | | |
| $1,69 \times 10^5$ | 12 | | |
| $1,97 \times 10^5$ | 14 | | |

En la segunda etapa se determinan los valores de los coeficientes para ángulos de ataque entre 0° y 180° con intervalos de 15° incluyendo así la totalidad de los presentados en las normativas anteriormente referenciadas. En estas mediciones se emplea como hipótesis que para la mayor de las velocidades propuestas en la primera etapa del ensayo, los coeficientes de forma no sufren variaciones significativas.

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Para la realización del ensayo se construye un modelo rígido de presión (MRP), a partir del prototipo de la sección compuesta objeto de estudio, empleando escala real 1:1, lo que facilita la construcción del mismo y su posterior instrumentación. El modelo se coloca en la mesa de simulación M-1 (figura 2) para el empleo en los ensayos de un perfil constante de velocidades.

En la construcción del modelo se emplea madera y aluminio conformando una sección compuesta por dos perfiles angulares de alas iguales L 125 × 125 × 12 mm unidos por una plancha metálica formando un ángulo de 60°. La longitud total del modelo es de 1200 mm con una plancha de conexión a 500 mm de los extremos del modelo. En la figura 4 se presenta una elevación, una sección y una imagen del modelo.

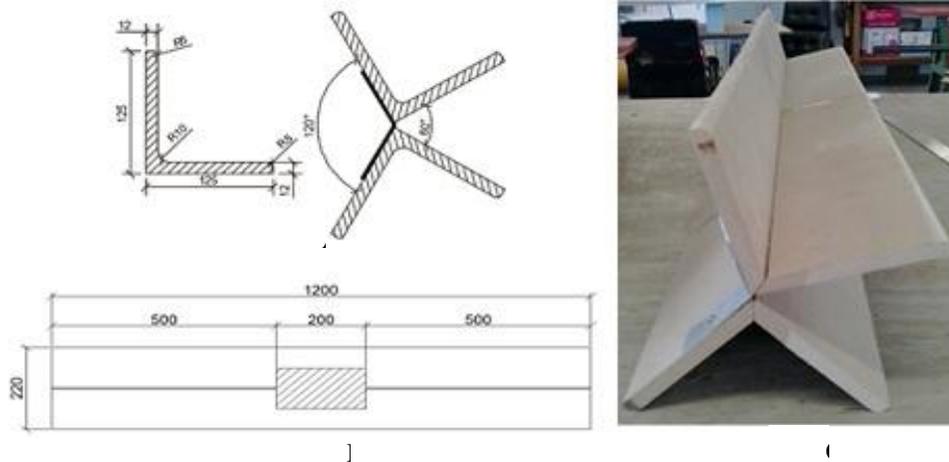


Figura 4. Geometría del modelo. A) Sección transversal. B) Elevación longitudinal. C) Imagen del modelo construido

ADQUISICIÓN DE DATOS E INSTRUMENTACIÓN DEL MODELO

En la adquisición de datos de presión, se emplea un Scanivalve de 6 módulos y 68 canales por módulo. Los transductores de presión integrados en este equipo poseen una frecuencia de adquisición de 512 Hz. En ambos experimentos, se empleó un tiempo de adquisición de 16 segundos. Para la medición de la velocidad del flujo fue utilizado un tubo de Pitot de dos canales que permite registrar la presión estática y la presión total del flujo generado. La determinación de los valores instantáneos de velocidad a partir de las lecturas del tubo de Pitot se lleva a cabo empleando las expresiones

$$V = \sqrt{\frac{2g(\Delta Pa)}{\rho}}, \quad (2)$$

$$\Delta Pa = (p_t - p_s), \quad (3)$$

donde: p_t - presión total, p_s - presión estática,
 g - aceleración de la gravedad, ρ - densidad del aire.

La temperatura dentro de la sección de ensayo se registró con un ManoAir 500 y la presión atmosférica externa al túnel se obtuvo con un barómetro NOVUS/HUBA.

Para la adquisición de datos se instrumentó la sección central del modelo con un total de 68 tomas de presión, captando el efecto de la plancha de unión como se muestra en la figura 5, para la colocación de las tomas de presión el criterio a seguir fue el de disminuir el espaciamiento de las mismas en las zonas cercanas a las aristas del modelo para poder captar la posición del punto de desprendimiento del flujo. Integrando las presiones registradas fueron determinados los coeficientes de forma C_{Fx} paralelo al flujo y C_{Fy} perpendicular al mismo.

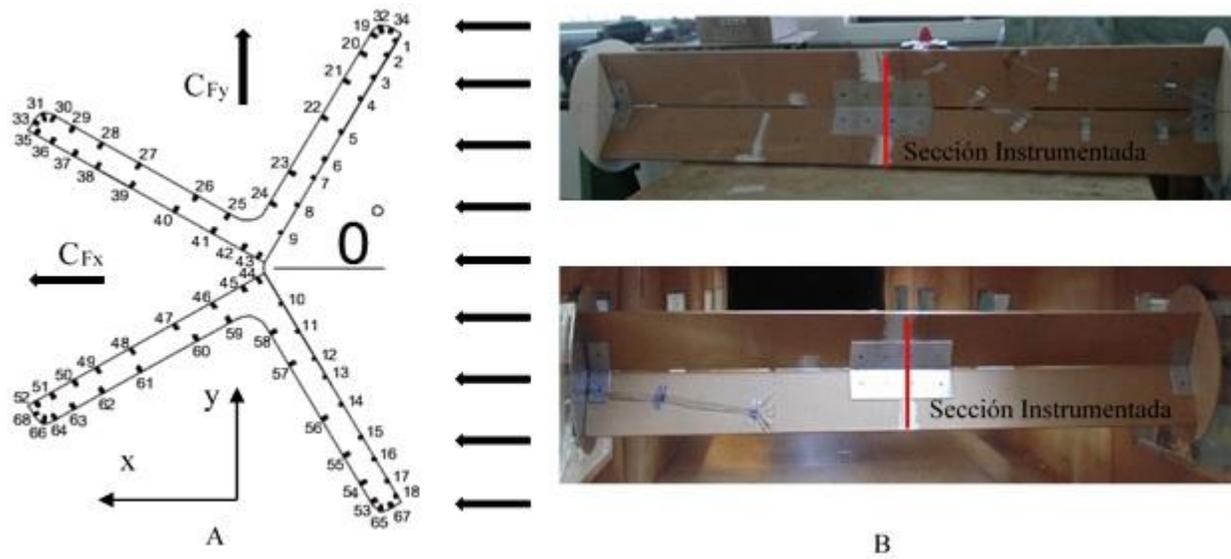


Figura 5. Instrumentación del modelo. A) Sección central instrumentada. B) Imágenes del modelo instrumentado

OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES PARALELO Y PERPENDICULAR AL FLUJO, C_{FX} Y C_{FY} RESPECTIVAMENTE

Para la obtención de los coeficientes aerodinámicos C_{Fx} y C_{Fy} se consideran los ejes (x) y (y) para las direcciones paralelas y perpendiculares al flujo respectivamente. El cálculo de dichos coeficientes a partir de las lecturas registradas por el Scanivalve se realizó a través de la obtención de los coeficientes de presión C_p de acuerdo con la expresión

$$C_{pi} = \frac{\Delta Pa_i}{q} \quad (4)$$

$$q = 0,5 \rho V^2 \quad (5)$$

donde: C_{pi} - coeficiente de presión de la toma i , q - presión dinámica (Pa),
 ΔPa_i - presión efectiva registrada en la toma de presión i (Pa),
 V - velocidad del flujo (m/s) registrada dentro del túnel de viento con el tubo de Pitot.

En la determinación del C_{pi} se emplean los valores medios de ΔPa_i obtenidos de la serie temporal de lecturas de presión en cada toma durante los 16 segundos de adquisición,

generándose 8192 lecturas en cada toma, para cada ángulo de ataque ensayado. Con los C_{pi} se determina el coeficiente de forma correspondiente a la toma i mediante las expresiones:

$$C_{Fxi} = \sum_{i=1}^n C_{pi} A_i \cos \theta_i, \quad (6)$$

$$C_{Fyi} = \sum_{i=1}^n C_{pi} A_i \sen \theta_i, \quad (7)$$

donde: C_{Fxi} - coeficiente de forma en el eje x correspondiente a la toma i , C_{Fyi} - coeficiente de forma en el eje y correspondiente a la toma i , A_i - área tributaria correspondiente a la toma i (m^2), θ_i - ángulo que forma la toma i con respecto al eje de referencia horizontal.

Finalmente, los coeficientes de forma C_{Fx} y C_{Fy} se obtienen mediante

$$C_{Fx} = \frac{1}{A} \sum C_{Fxi} \Delta A_i, \quad (8)$$

$$C_{Fy} = \frac{1}{A} \sum C_{Fyi} \Delta A_i, \quad (9)$$

donde: ΔA_i - es el área de influencia de la i -ésima toma de presión, A (m^2) - es el área proyectada en el eje x paralela al flujo, considerando un ángulo de ataque de 0° y longitud unitaria (Prud'homme et al. 2014).

Correcciones por efecto de bloqueo

El efecto de bloqueo se produce a partir de la relación S/C generada entre la proyección del modelo normal al flujo (S) y altura de la sección del túnel (C), correspondiente a la Mesa I, al emplearse en ambas etapas del ensayo un flujo bidimensional (figura 6).

La literatura consultada refiere que, para relaciones de bloqueo (S/C) inferiores al 5 %, el efecto que esta ejerce sobre los resultados puede despreciarse (Carril and Isyumov 2003), (Anthoine and Olivari 2009) a pesar de que normativas como la ASCE/SEI (2010) permiten hasta un 8 % de relación de bloqueo en la realización de ensayos.

El modelo empleado genera una relación máxima de bloqueo del 24 % correspondiente al ángulo de ataque de 0° , por lo que se hacen necesarias las correcciones de C_{Fx} y C_{Fy} . Las correcciones son efectuadas a partir de la teoría semi-empírica desarrollada por Maskell (1963), basada en la corrección de la presión dinámica q dentro del túnel de viento. Esta teoría es aplicable para cuerpos no aerodinámicos ensayados en túnel de sección cerrada, proponiéndose la expresión

$$\Delta q/q = \varepsilon C_D \frac{S}{C}, \quad (10)$$

donde: Δq es el incremento efectivo de la presión dinámica debido a la reducción en el área de circulación del flujo, $\Delta q = q_c - q$ siendo q la presión dinámica registrada en el ensayo,

q_c es la presión dinámica corregida, C_D el coeficiente de arrastre y ε factor de bloqueo, tomándose $\varepsilon = 0,962$ al tratarse de un flujo bidimensional (Maskell 1963).

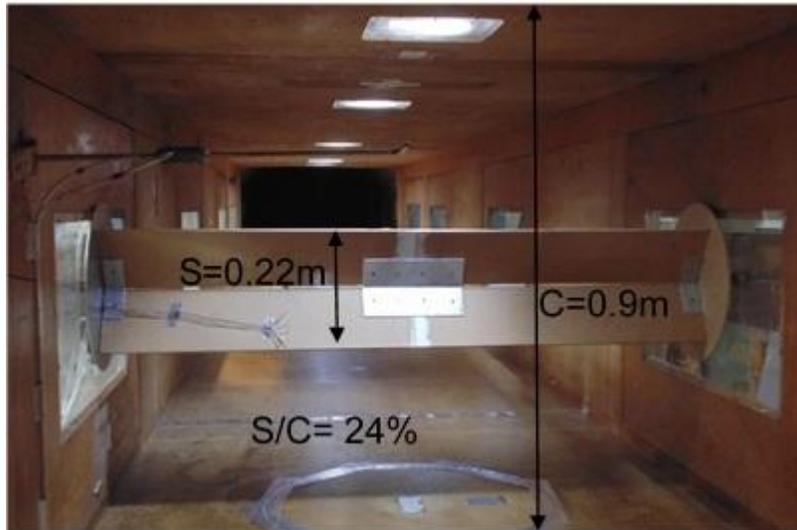


Figura 6. Fotografía del interior del túnel de viento, con el modelo instalado

El coeficiente de arrastre C_D es obtenido a partir de la cuantificación de los efectos de la presión y la fricción del flujo sobre el obstáculo. En caso de solo considerar los efectos de la presión este coeficiente se denomina coeficiente de forma C_F .

En el presente trabajo, al construirse un MRP solo son considerados los efectos de la presión del flujo a través de las tomas de presión por lo que la expresión (10), en términos de los coeficientes de forma, queda según las expresiones:

$$\Delta q/q = \varepsilon C_{Fx} \frac{S}{C}, \quad (11)$$

$$\Delta q/q = \varepsilon C_{Fy} \frac{S}{C}, \quad (12)$$

RESULTADOS

En tabla 2 se representan los valores de los coeficientes de forma, ya corregidos, paralelo y perpendicular al flujo, C_{Fx} y C_{Fy} , respectivamente, obtenidos en la primera etapa del ensayo para las 5 velocidades de flujo estudiadas en cada uno de los tres ángulos de ataque seleccionados. Son representados los valores obtenidos para el flujo uniforme de baja intensidad de turbulencia ($I = 0,5 \%$) y uniforme de alta intensidad de turbulencia ($I = 10,5 \%$). Estos valores son graficados en las figuras 7 y 8

Tabla 2. Resultados primera etapa del ensayo

| Ángulo de ataque | Re | C_{Fx} | | C_{Fy} | |
|------------------|--------------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | | I = 0,5 % | I = 10,5 % | I = 0,5 % | I = 10,5 % |
| 0° | $7,00 \times 10^4$ | 2,57 | 2,55 | -0,07 | -0,10 |
| | $1,13 \times 10^5$ | 2,56 | 2,54 | -0,12 | -0,11 |
| | $1,40 \times 10^5$ | 2,54 | 2,58 | -0,16 | -0,12 |
| | $1,69 \times 10^5$ | 2,54 | 2,56 | -0,17 | -0,11 |
| | $1,97 \times 10^5$ | 2,54 | 2,58 | -0,13 | -0,09 |
| 45° | $7,00 \times 10^4$ | 1,99 | 2,05 | -0,73 | -0,74 |
| | $1,13 \times 10^5$ | 2,02 | 1,94 | -0,76 | -0,85 |
| | $1,40 \times 10^5$ | 2,03 | 1,96 | -0,78 | -0,86 |
| | $1,69 \times 10^5$ | 1,94 | 1,96 | -0,79 | -0,81 |
| | $1,97 \times 10^5$ | 1,98 | 1,95 | -0,75 | -0,81 |
| 90° | $7,00 \times 10^4$ | 1,37 | 1,35 | 0,67 | 0,64 |
| | $1,13 \times 10^5$ | 1,36 | 1,32 | 0,70 | 0,68 |
| | $1,40 \times 10^5$ | 1,39 | 1,36 | 0,64 | 0,66 |
| | $1,69 \times 10^5$ | 1,38 | 1,35 | 0,65 | 0,63 |
| | $1,97 \times 10^5$ | 1,39 | 1,39 | 0,64 | 0,59 |

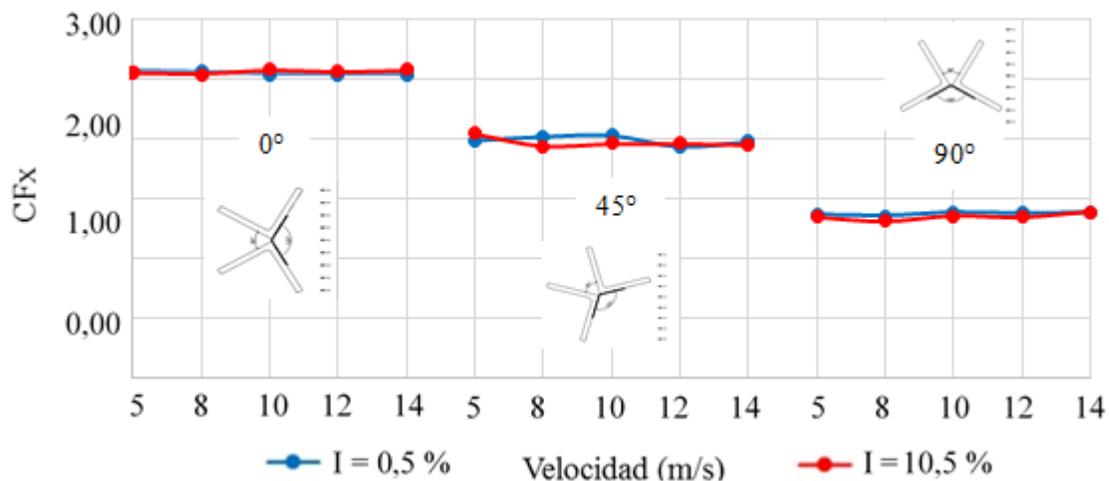


Figura 7. Valores de C_{Fx} correspondientes a la primera etapa del ensayo

En los gráficos se aprecia que para los valores de C_{Fx} la variación de la intensidad de turbulencia del flujo modifica o no los resultados de forma significativa en los ángulos de ataque ensayados. Además, puede apreciarse que a partir de una velocidad 5 m/s correspondiente a un $Re=7 \times 10^4$ los coeficientes presentan variaciones inferiores a un 5 % por lo que el comportamiento de C_{Fx} es independiente del aumento de la velocidad del flujo para las velocidades estudiadas.

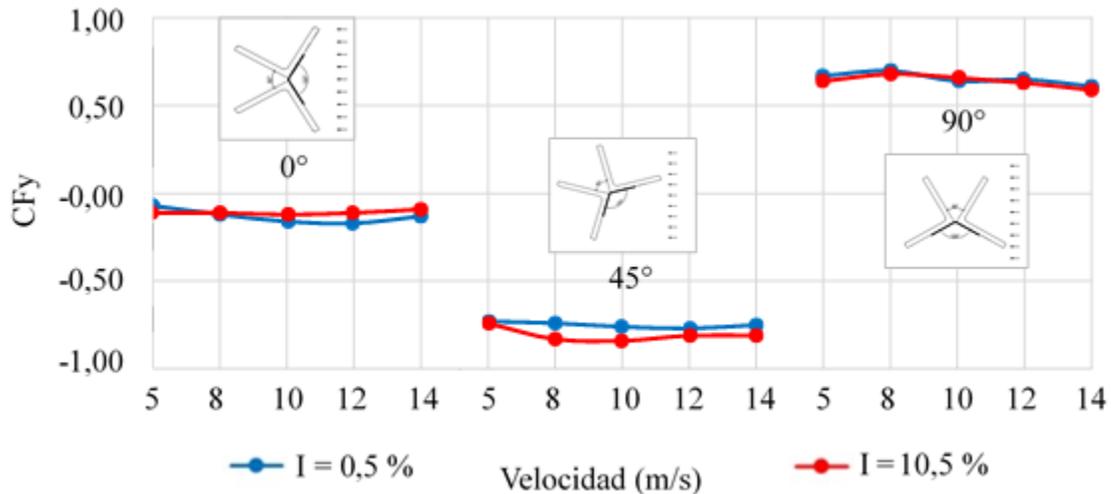


Figura 8. Valores de C_{Fy} correspondientes a la primera etapa del ensayo

En los valores de los coeficientes de forma C_{Fy} se aprecia que el aumento de la intensidad de turbulencia del flujo repercute en el aumento de los valores de este coeficiente de hasta un 30 % con una velocidad de flujo de 5 m/s para el ángulo de ataque de 45°. En el resto de los ángulos de ataque el incremento de la intensidad de turbulencia no influye de manera significativa en estos coeficientes.

Para los ángulos de 0° y 90° el aumento de la velocidad del flujo no provoca variaciones significativas a partir de 5 m/s, en el caso de 45°, las diferencias en los valores no superan el 10 %. Los resultados obtenidos son consistentes con el comportamiento característico de los cuerpos no aerodinámicos con aristas vivas, donde se encuentra el punto de desprendimiento del flujo, y la velocidad y turbulencia del flujo poseen poca influencia.

En las figuras 9 y 10 se representan, agrupadas en 8 zonas, la distribución de los coeficientes de presión (C_p) en la sección instrumentada correspondiente a los tres ángulos de ataque ensayados para flujo uniforme de baja intensidad de turbulencia para velocidad de flujo $V = 5$ m/s.

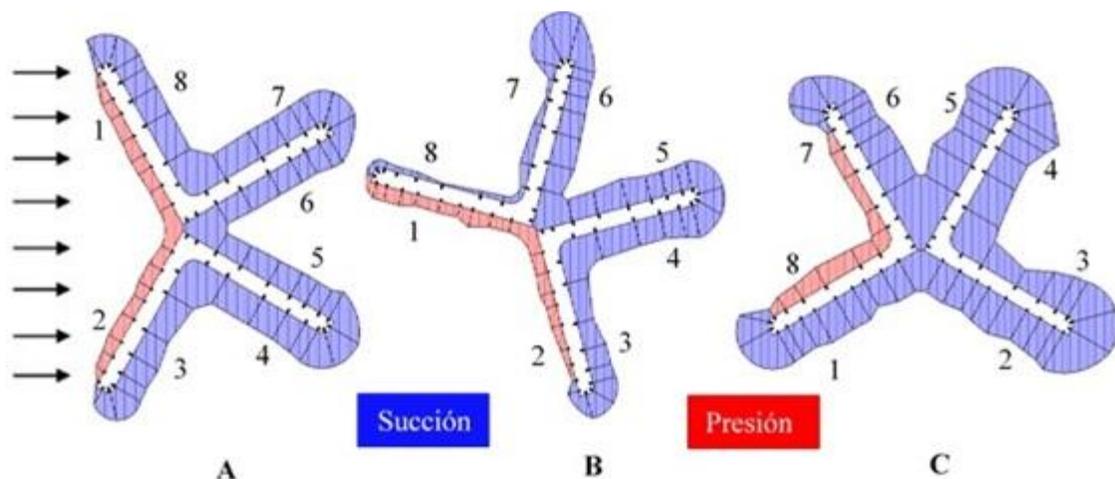


Figura 9. Distribución de los coeficientes de presión en la sección instrumentada, flujo uniforme de baja intensidad de turbulencia. A: 0°. B: 45°. C: 90°

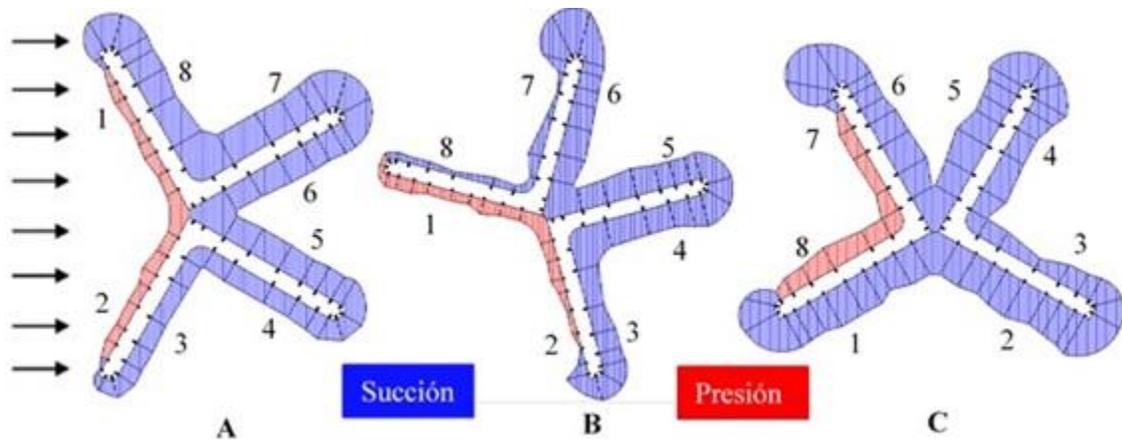


Figura 10. Distribución de los coeficientes de presión en la sección instrumentada, flujo uniforme de alta intensidad de turbulencia. A: 0°. B: 45°. C: 90°

Para el ángulo de 90° las diferencias entre los coeficientes de presión son visibles en las zonas 2, 3 y 4, donde se aprecia que con el aumento de la intensidad de turbulencia disminuyen los coeficientes de presión en estas zonas.

Para el ángulo de 0°, debido a la simetría de la sección con respecto al flujo, la tendencia del C_{Fy} es a tomar valores nulos.

En el caso del flujo uniforme de baja intensidad de turbulencia, se obtuvo un valor de $C_{Fy} = 0,07$ dado por la diferencia observada entre los valores de coeficientes de presión correspondientes a las zonas 2, 3, 4 y 5 con los de las zonas 6, 7, 8 y 1 (ver figura 10 A).

En el caso del flujo uniforme de alta intensidad de turbulencia esta diferencia es del 7 %, razón por la cual el $C_{Fy} = 0,11$.

En la segunda etapa del experimento se obtienen los valores de C_{Fx} y C_{Fy} para 13 ángulos de ataque de 0° a 180° con intervalos de 15°. En las figuras 11 y 12 se muestran estos resultados.

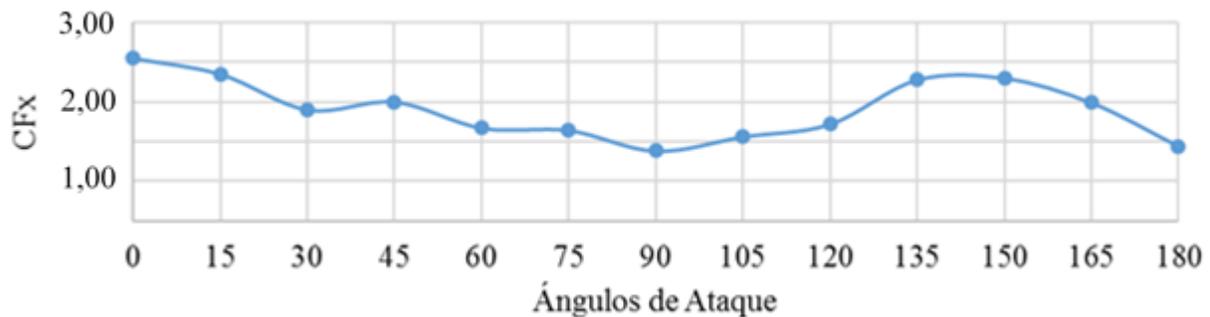


Figura 11. Valores de C_{Fx} obtenidos en la segunda etapa del ensayo

Los resultados muestran que el mayor $C_{Fx} = 2,55$ corresponde al ángulo de 0° donde se obtiene la mayor proyección de la sección ante el flujo, los menores valores se reportan en torno a los 90° correspondiente a la menor proyección ante el flujo.

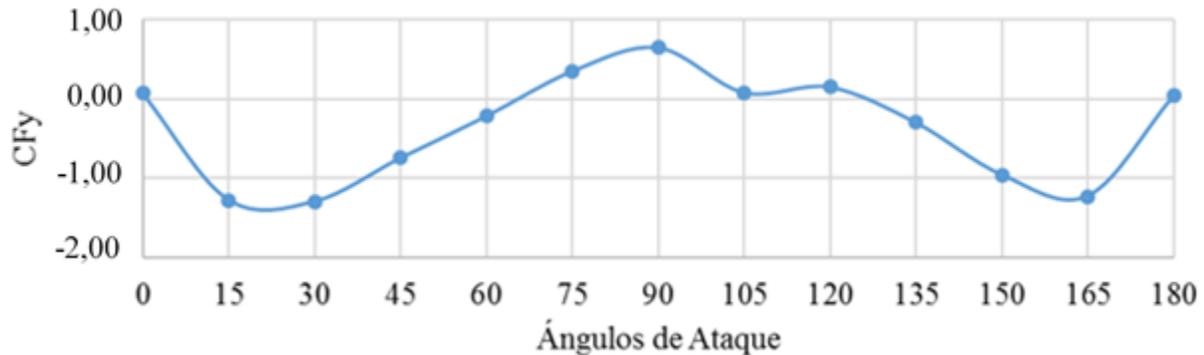


Figura 12. Valores de C_{Fy} obtenidos en la segunda etapa del ensayo

En el caso de los coeficientes de forma transversales al flujo, el mayor valor absoluto de $C_{Fy} = -1.3$ corresponde al ángulo de ataque de 30° donde se reporta la mayor asimetría con respecto al eje horizontal de la sección compuesta, los menores valores son obtenidos para los ángulos de 0° y 180° que presentan simetría con respecto al eje horizontal.

En la tabla 3 se presenta un resumen de los valores obtenidos en la segunda etapa del ensayo.

Tabla 3. Resumen de la segunda etapa.

| α | C_{Fx} | C_{Fy} |
|----------|----------|----------|
| 0 | 2,55 | 0,07 |
| 30 | 1,90 | -1,30 |
| 45 | 2,00 | -0,76 |
| 90 | 1,38 | 0,66 |
| 135 | 2,28 | -0,30 |
| 180 | 1,85 | 0,04 |

Con el objetivo de estudiar la influencia del empleo de coeficientes aproximados en los diseños de torres de telecomunicaciones que emplean la sección compuesta objeto de estudio, en las figuras 13 y 14 se muestran los gráficos comparativos de los valores de C_{Fx} y C_{Fy} , respectivamente, de la sección compuesta objeto de estudio, un angular de alas iguales y una sección compuesta por dos angulares de alas iguales unidos por su eje longitudinal a 90° ambos referidos en las normativas consultadas (NC285 2003), (ASCE/SEI 2010), son reflejados los ángulos de ataque comunes para las tres secciones.

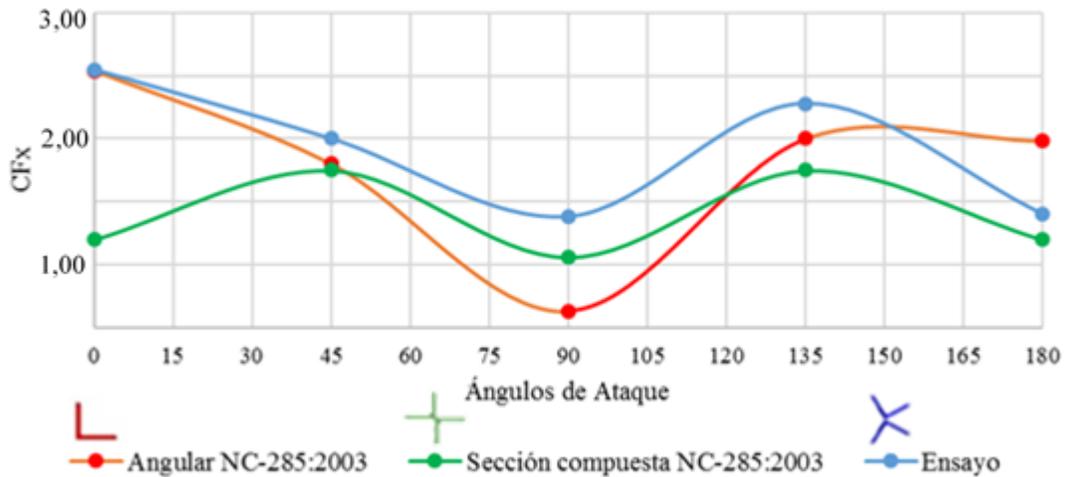


Figura 13. Comparación de valores de C_{Fx}

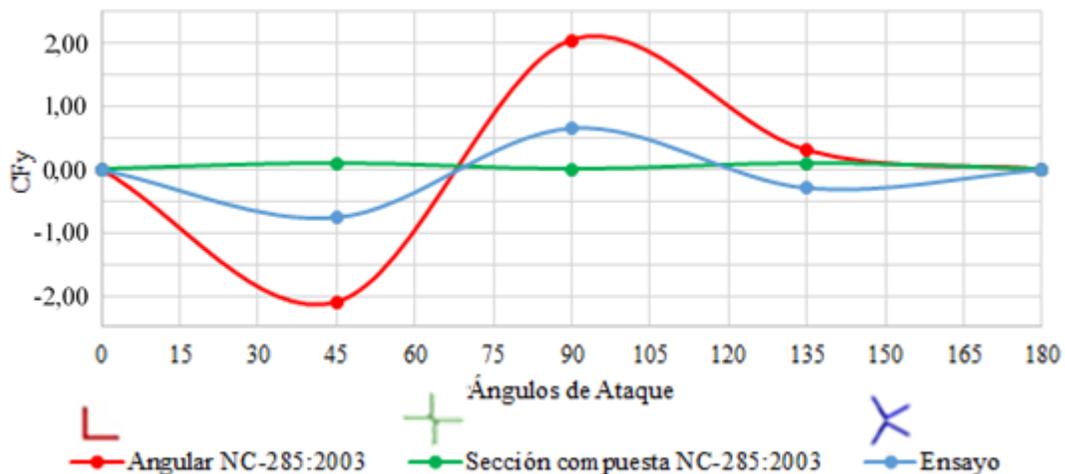


Figura 14. Comparación de valores de C_{Fy}

Los gráficos comparativos muestran que existen notables diferencias entre los coeficientes de forma obtenidos en el ensayo experimental realizado a la sección compuesta objeto de estudio y secciones similares presentes en las normativas consultadas (NC285 2003), (ASCE/SEI 2010).

En el caso de C_{Fx} se aprecia una tendencia similar en los valores de la sección compuesta ensayada y el angular de alas iguales, sin embargo, existen diferencias superiores al 50 % para 90°, de 10 % para 135° y del 30 % para 180°. Con respecto a la sección compuesta por dos angulares unidos por su eje longitudinal formando un ángulo de 90°, las diferencias son significativas en todos los ángulos de ataque presentados reportándose diferencias superiores al 50 % para 0°, 90° y 180°. Para los ángulos de ataque de 45° y 135° las diferencias alcanzan el 12,5 % y 23 % respectivamente.

Para los coeficientes C_{Fy} , al igual que para C_{Fx} se aprecia un comportamiento similar en los valores de la sección compuesta ensayada y el angular de alas iguales reportándose diferencias superiores al 60 % para los ángulos de 45°, 90° y 135°.

En el caso de la sección compuesta por dos angulares unidos por su eje longitudinal formando un ángulo de 90° se reportan diferencias significativas para los ángulos de 45°, 90° y 135° con diferencias que superan el 30 %.

CONCLUSIONES

- En el presente trabajo fue realizado un ensayo experimental en túnel de viento para la determinación de los coeficientes de forma en una sección compuesta por angulares de alas iguales empleada en Cuba para la construcción de torres de telecomunicaciones autosoportadas de base triangular; esta sección compuesta al no estar referida en las normas de cálculo de carga de viento consultadas (NC285 2003), (ASCE/SEI 2010) en la práctica es diseñada con valores aproximados de coeficientes de forma.
- El ensayo realizado fue dividido en dos etapas, en la primera fueron seleccionados tres ángulos de ataque 0°, 45° y 90° para el estudio de la influencia del aumento de Re y del contenido de turbulencia presente en el flujo. En la segunda etapa son obtenidos los coeficientes de forma para ángulos de ataque entre 0° y 180° con intervalos de 15°. Adicionalmente los valores obtenidos son comparados con los valores de coeficientes de forma de un angular de alas iguales y una sección compuesta por dos angulares de alas iguales unidos por su eje longitudinal formando un ángulo de 90° reportados en las normas consultadas (NC285 2003), (ASCE/SEI 2010).
- Los resultados obtenidos en la primera etapa del ensayo avalan las hipótesis que se asumen para la segunda etapa donde se propone un único flujo uniforme de baja intensidad de turbulencia, al no presentar diferencias significativas con los valores correspondientes al flujo uniforme de alta intensidad de turbulencia. La distribución de coeficientes de presión generada en la sección con el flujo uniforme de baja intensidad de turbulencia se corresponde con el comportamiento de cuerpos no aerodinámicos con aristas vivas donde el desprendimiento del flujo se produce en las aristas del obstáculo. Los mayores valores de $C_{Fx} = 2,55$ se obtienen para un ángulo de ataque de 0°. Para el ángulo de ataque de 30° son reportados los mayores valores absolutos de $C_{Fy} = -1,30$.
- En el estudio comparativo realizado entre la sección compuesta objeto de estudio y las dos secciones escogidas de las normas consultadas (NC285 2003), (ASCE/SEI 2010) se reportan diferencias superiores al 50 % en ambos coeficientes C_{Fx} y C_{Fy} , lo que avala la importancia del estudio experimental realizado.

REFERENCIAS

- Anthoine J. and Olivari D.** (2009). “Wind-tunnel blockage effect on drag coefficient of circular cylinders”, *Wind and Structures*, doi: 10.12989/was.2009.12.6.541, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Bélgica.
- ASCE/SEI** (2010). “Minimum design loads for buildings and other structures”, American Society of Civil Engineers, ISBN 978-0-7844-1085-1, Reston, Virginia, USA
- Blessmann J.** (1982). “The boundary layer TV-2 wind tunnel of the UFRGS”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 10, pp. 231–248, ISSN 0304-3908, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Carril F. and Isyumov N.** (2003). “Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas.”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 91, pp.1007–1022, doi:10.1016/S0167-6105(03)00049-7, Elsevier, Ontario, Canadá.
- Flachsbart O. and Winter H.** (1935). “Model research on the wind loading of lattice structures”, Traducido del alemán por B.L Tucker en 1955, publicación original "Modellversuche über die Belastung von Gitterfachwerken durch Windkräfte." *Journal Der Stahlbau*, Parte 1, Abril 27, 1934, 65- 69 y Mayo 11, 1934, 73- 79, Parte 2, Abril 26, 1936, 65-77, Albuquerque, Nuevo México.
- Maskell E. C.** (1963). “A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel”, Ministerio de Aviación, Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, Reporte No. Aero. 2685-A.R.C. 25730, Londres.
- NC285** (2003). “Carga de viento. Método de cálculo”, Oficina Nacional de Normalización, ICS: 91.080.01 1, primera edición, Vedado, La Habana.
- Prud'homme S., Legeron F., Laneville A., and Tran M. K.** (2014). “Wind forces on single and shielded angle members in lattice structures”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 20–28, ISSN: 0167-6105, Canadá extraído de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.10.003> en enero 2014.
- Slater J. E.** (1969). “Aeroelastic instability of a structural angle section”, Tesis de Doctorado, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Canadá.
- Streeter V. L., Wylie E. B. y Bedford K. W.** (2000). “Mecánica de Fluidos”, novena edición, McGraw-Hill Interamericana, editorial Félix Varela, ISBN 0-07-062537-9, La Habana.